

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

複合材料組件疲勞及破壞之有限元素分析(III)

計畫編號：NSC 87-2212-E-002-017

執行期限：86年8月1日至87年7月31日

主持人：鄭榮和 國立臺灣大學機械工程研究所

一、中文摘要

本研究以輪胎(含簾布層)為實際組件，利用有限元素分析工具模擬複合材料硬化過程。經由比較實驗與數值之結果而確定實際生產中之問題，進而釐清輪胎不當爆胎之原因。由於硬化狀態影響材料的機械性質，因此若某部位的橡膠硬化程度不足，則將嚴重影響輪胎的品質。此結果可由本研究所使用型號的輪胎大多由某特定位置產生爆胎，而得到驗證。

關鍵詞：複合材料，硬化機制，有限元素模擬，輪胎成形

Abstract

In this study, finite element simulation of curing process for the composite material system is developed. The experimental data and simulation results are compared and used to resolve unexpected blowup problem of a type of pneumatic tire. Since the curing degree of the composite material strongly affect its quality, the results from this study verify that the cause of such unexpected blowup of the tire is largely due to the insufficient cure.

Keywords : Composite Material, Curing Mechanism, Finite Element Simulation, Formation of Pneumatic Tire

二、計畫緣由與目的

本計畫為群體計畫「熱塑性與熱固性複合材料組件疲勞及破壞之分析與評估」之第四子計畫。本研究的目標是希望能提出完整且簡易使用的模式或判準，將之加入有限元素軟體中以供設計工程師採用於預測複合材料的損傷與破壞行為。過去兩年的研究已完成以位移為變數之破壞判準以及含異向性損傷變數之複合材料本構行為模式，經由有限元素分析與實驗結果相驗證已證實所提理論模式之正確與優異。

第三年的規劃原預定將以上之模式與軟體應用於大型複合材料組件之疲勞及破壞分析，惟初步試作組件的實驗發現相當多的成形缺陷，如脫層，局部挫曲等，如此之成品恐難有一定的起始比較點；因此本子計畫第三年的工作重點除了繼續支援其他子計畫之實驗模擬之外，主要的方向稍作修改為推導描述材料高溫變形的數學模式包括基材硬化(curing)的機制，並撰寫有限元素軟體以模擬成形過程。

三、研究流程

首先以高溫拉伸試驗所求得的數據加入有限元素軟體。以簡單幾何形狀之試片驗證所採用數學模式以及材料常數的適用性與正確性，最後以實際組件的成形模擬與實驗結果相比較並檢驗硬化程

度。希望透過此模擬技術的建立可提供解決成形中缺陷的方向並探討冷卻速率與其他參數對組件品質的影響。

由於複合材料相當昂貴，大多由國外進口，且量測高溫材料性質之儀器設備相當繁雜且貴重，因此，本計畫遂與位於彰化縣大村鄉中山路二段 300 號之「華豐橡膠工業公司」合作，以輪胎為本研究之實際組件，探討並解決上述製造上所遭遇之問題。

影響輪胎品質的因素有許多種，其中以硬化(curing)過程為重要的因素之一。硬化過程是製造輪胎的最後一個過程，在這個過程中生胎(green tire)經由模具所提供的高溫、高壓而成形為設計好的外形。此時熱量由模具及胎囊(bladder)內的高溫氣體傳入輪胎中，促使輪胎內的橡膠發生反應，一般稱之為硬化或硫化(vulcanization)，此反應使橡膠轉變成一種較具彈性的聚合物以符合輪胎性能的需要。

傳統的輪胎設計是利用近似的實驗，以及昂貴的試誤法所得的經驗累積。近年來，由於工業發展的需求，傳統的試誤法已不符市場需求，有限元素分析可獲得許多實驗時無法量測的數據，且對成形的過程參數可以探索和追溯，有助分析者觀察整個成形的過程，使設計者能設計出較佳的製造程序。對產品品質的改良與減少成本等，有莫大的助益。

本研究以有限元素法分析模擬輪胎的成形硬化過程，研究程序如圖 1。首先由文獻中找出適用於橡膠的硬化反應動力學方程式，再經由實驗求取方程式中各個參數，以及其他材料常數，下一步便進行分析工作，在應用此模型於整個輪胎的分析前先模擬簡單形狀試片，以驗證此模

型之適用性與正確性。初步驗證後便可模擬實際輪胎的硬化過程，並與實驗結果比較驗證，以進一步確認模型的正確性，最後便利用此模型探討不同的硬化加工程序對輪胎品質的影響。

在文獻中輪胎硬化的數值模擬已經有許多的研究，首先 Ambelang 和 Prentice[1] 利用有限差分法 (finite difference) 計算硫化輪胎的硬化狀態(state of cure, SOC)，不過他們假設材料常數及邊界條件均是固定不變的。Prentice 和 William[2] 則對上述的研究加以延伸，然而他們假設輪胎為均質的。Toth 等人[3] 利用 ABAQUS 解這個熱傳與硬化結合的問題。Han 等人[4] 則是自行發展一套程式來解此問題。

四、硬化模型

4.1 熱傳方程式

硬化過程是由於熱量傳入輪胎內而引發的化學反應，故分析此問題首先需考慮熱傳方程式：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (1)$$

$$Q = \rho (-\Delta H) \frac{dX}{dt} \quad (2)$$

為密度， C_p 為比熱， k 為熱傳導係數， Q 為單位體積的熱生成率， H 為硫化熱， X 則為硬化狀態。

4.2 硬化反應動力學

硬化反應是一個化學反應，硬化狀態即代表此反應的程度。一般最常用來求得硬化狀態的實驗為 MDR (moving die rheometer) 實驗，此實驗對試片施以一固定的扭轉速度，紀錄所需扭矩對時間的曲線。圖 2 為典型的 MDR 實驗結果，通常在一開始時會有一個誘導期(induction

period), 此時扭矩幾乎不改變, 直到誘導時間(induction time)後扭矩開始增加, 最後扭矩不再增加達到一個穩定狀態。利用此圖我們便可對硬化狀態 X 做一個定義:

$$X(t) = \frac{\Gamma(t) - \Gamma(0)}{\Gamma(\infty) - \Gamma(0)} \quad (0 < X < 1) \quad (3)$$

X 的意義為扭矩的變化程度, 當 $X=0$ 時表示尚未硬化, 而當 $X=1$ 時表示完全硬化。將圖 2 數量化, 由文獻中知可得下列方程式:

$$\frac{dX}{dt} = K(1 - X) \quad \text{for } t > t_i \quad (4)$$

$$K = K_0 \text{Exp}(-E_a / RT) \quad (5)$$

$$t_i = t_{i0} \text{Exp}(E_i / RT) \quad (6)$$

K 為反應速率常數而 t_i 為誘導時間, 兩者均為溫度的函數有(5) (6) 的關係, K_0 , E_a , t_{i0} 及 E_i 均為常數。由(4)-(6)可解得任一時刻的 X 。

4.3 橡膠的材料性質

方程式(1)中出現的橡膠材料性質為溫度及硬化狀態的函數, 為簡化問題將材料性質做如下的假設:

$$k(T) = a + bT \quad (7)$$

$$\dots(X) = (1 - X)\dots_u + X\dots_c \quad (8)$$

$$C_p(T, X) = (1 - X)C_{pu} + XC_{pc} \quad (9)$$

$$C_{pu}(T) = a_u + b_u T \quad (10)$$

$$C_{pc}(T) = a_c + b_c T \quad (11)$$

下標 u 代表未硬化, c 代表為完全硬化。以上材料常數可由相關實驗或由文獻中求得 而(5)及(6)中的四個常數可藉由數個不同溫度下 MDR 實驗進行曲線湊配 (curve fitting)求得。

五、有限元素模擬與驗證

5.1 模擬分析程序

在分析前先對此問題做一些合理的假設:

1. 將輪胎視為軸對稱的物體。
2. 輪胎內量很小的橡膠以鄰近的橡膠視之。

本研究的重點在整個輪胎的硬化模擬, 可忽略胎紋部分, 而以軸對稱簡化。量小的橡膠其材料性質的差異不會對整個輪胎有太大的影響, 故以鄰近橡膠取代。邊界條件則以實際輪胎邊界的溫度歷程當成邊界條件, 可由熱偶(thermal couple)求得。開始分析前利用網格產生軟體 I-DEAS 建立網格(圖 3)。本研究中的材料常數會隨著硬化程度而改變, 而本研究所使用的分析軟體 ABAQUS 並無此變數, 但其提供一個 USDFLD 的使用者副程式, 允許使用者將硬化程度視作場變數(field variable), 在此副程式中計算此場變數。執行此分析軟體時, 在每一時間增量開始後, 主程式呼叫 USDFLD, 計算材料的硬化程度, 然後回到主程式計算其材料性質, 再進行模擬分析(圖 4)。

5.2 模擬與驗證

由熱偶所量得的輪胎邊界溫度曲線(圖 5), 此輪胎在模具中加溫 1500 秒, 然後灌冷卻水 180 秒, 在抽真空 90 秒, 最後脫膜放入空氣中冷卻。圖 6 為模擬與實驗所得溫度歷程之比較, 可看出模擬與實驗有一致的結果。經此一驗證工作可確定此模型是可信賴的, 因此可用以模擬無法直接由實驗求得的硬化狀態。

六、結果與討論

圖 7 為模擬分析結果, 在經過硬化、冷卻過程後所分析的輪胎在胎唇附近部位仍有未達到完全硫化的情形, 而圖 8 為輪胎各部位的硬化程度對時間的曲線, 除胎唇附近之橡膠外, 大部分的橡膠在加熱時期就已經達到相當高的硬化狀態, 然而

胎唇部位之橡膠在加熱期後才開始反應，且到最後其硬化狀態僅達到 0.8 左右，而無法達到完全硬化的狀態。由於硬化狀態影響了材料的機械性質，因此此部位的橡膠其機械性質可能強度不足，而影響了輪胎的品質。此結果可由此型號的輪胎大多由此處產生爆胎，而得到驗證。但未來仍需更進一步的驗證工作。

參考文獻

- [1] J. C. Ambelang and G. A. Prentice, "Digital Method of Calculating the Flow of Heat Through a Tire during Vulcanization," *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 45, No. 5, pp. 1195-1201 (1972).
- [2] G. A. Prentice and M.C. Williams, "Numerical Evaluation of the State of Cure in a Vulcanizing Rubber Article," *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 53, pp. 1023-1031 (1980).
- [3] W. J. Toth, J. P. Chang and C. Zanichelli, "Finite Element Evaluation of the State of Cure in a Tire," *Tire Science and Technology*, TSTCA, Vol. 19, No. 4, pp. 178-212 (1991).
- [4] I. -S. Han, C. -B. Chung, J. -H. Kim, S. -J. Kim, H. -C. Chung, C. -T. Cho and S. -C. Oh, "Dynamic Simulation of the Tire Curing Process," *Tire Science and Technology*, TSTCA, Vol. 24, No. 1, pp. 50-76 (1996).
- [5] A. I. Isayev and J. S. Deng, "Nonisothermal Vulcanization of Rubber Compounds," *Rubber Chemistry and Technology*, Vol. 61, pp.

341-361 (1988).

- [6] J. Steen, W. J. Aben and K. E. D. Wapenaar, "Optimization of the Vulcanization Process of Rubber Products," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 33, No. 3, pp. 183-189 (1993).

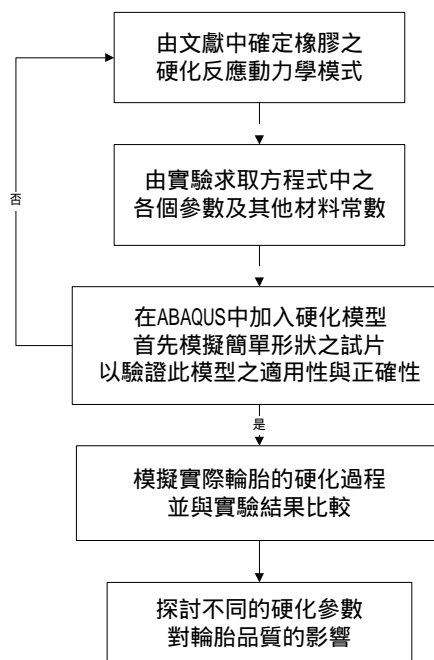


圖 1 研究流程圖

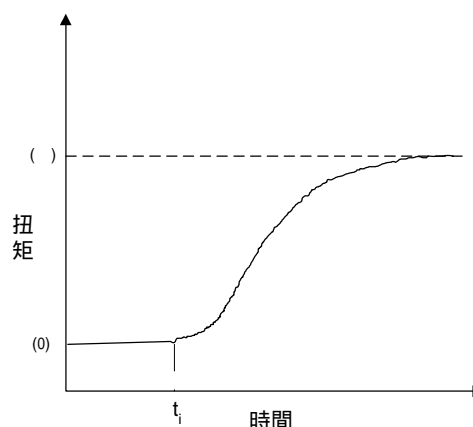


圖 2 典型 MDR 實驗結果

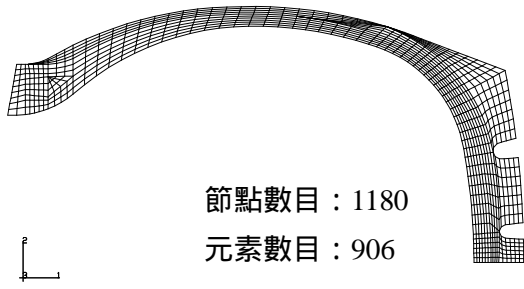


圖 3 輪胎之有限元素網格

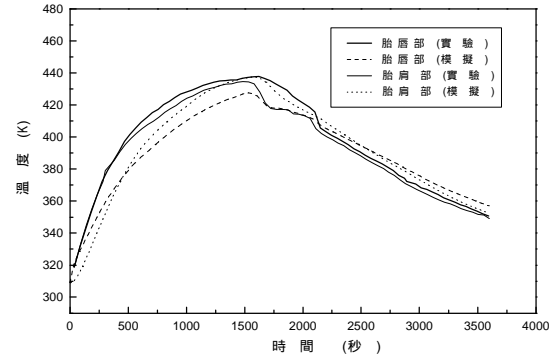


圖 6 實驗與模擬的比較

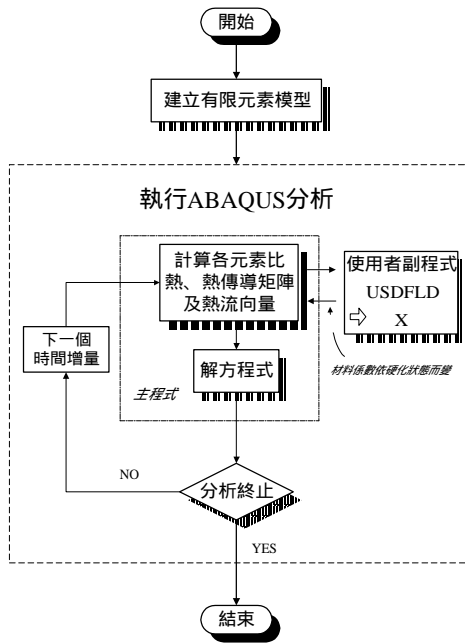


圖 4 ABAQUS 分析程序

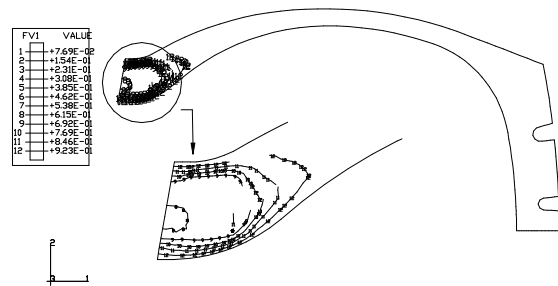


圖 7 硬化狀態分布圖

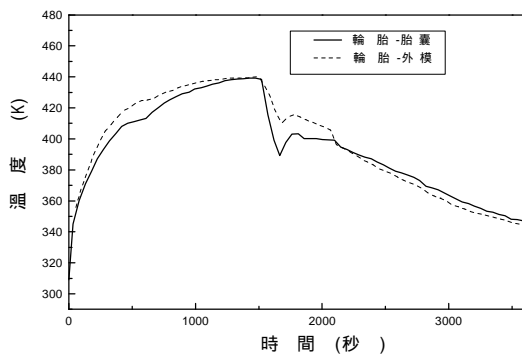


圖 5 輪胎邊界條件

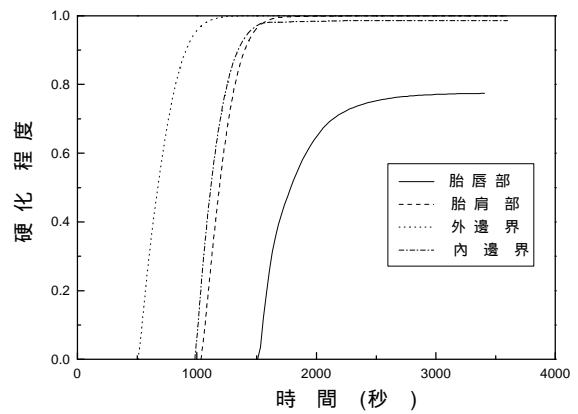


圖 8 輪胎內各部位硬化曲線